

基于红外运动目标分割的夜视融合系统设计

孙 斌,常本康,张俊举,王贵圆,李英杰

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要: 为了提高夜视系统的质量以及目标探测性能,设计了红外视频运动目标与可见光融合夜视侦察系统。系统在硬件处理平台上实现了基于人眼视觉的红外运动目标分割算法和基于目标特性的加权融合算法,采用红外运动目标分割电路和融合处理电路互联的结构,首先利用 FPGA 为核心的红外目标分割电路提取红外视频中的运动目标,然后将只有红外运动目标的视频输入后端 DSP 融合处理电路中进行融合处理,最后从系统中输出一系列目标形态突出、背景细节清晰的融合序列。实验结果表明:该系统可以提高夜视融合系统目标探测性能和探测概率,融合结果的各项评价指标提高了 90% 以上,有的评价指标甚至提高了 7 倍以上,可以很大程度地降低系统的虚警率。

关键词: 图像融合; 运动目标分割; 融合系统; 红外视频; 可见光图像

中图分类号: TN22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2064-06

Design of fusion system based on infrared moving target segmentation

Sun Bin, Chang Benkang, Zhang Junju, Wang Guiyuan, Li Yingjie

(School of Electronic Engineering and Optic-electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the fusion image quality and target detection performance of infrared and visible image fusion system, an image fusion reconnaissance system was designed which used moving target of infrared video and visual to monitor the scene. This system realized the infrared image segmentation algorithm based on human visual characteristics and weighted fusion algorithm based on target's characteristics in the hardware platform. Also, the system contained the circuit of infrared moving object segmentation and fusion processing circuit. Firstly, image segmentation circuit to extract the moving target of infrared video was designed by FPGA. Secondly, the image which only contained moving target was input to fusion processing circuit consisting of DSP. Last, a series of fusion images which had the characteristic of target form prominent and background details clear were furnished. Through the experiment, this system can both improve the target detection performance and processing speed. The image fusion evaluation increased more than 90%, and some indexes increased more than 7 times.

Key words: image fusion; moving object segmentation; fusion system; infrared video; visible light image

收稿日期:2014-11-14; 修订日期:2014-12-19

基金项目:国家自然科学基金(61101195);江苏省自然科学基金(BK20130775)

作者简介:孙斌(1986-),男,博士生,主要从事光电信号处理、光电系统设计方面的研究。Email:ffgz366@163.com

导师简介:常本康(1950-),男,教授,博士生导师,主要从事光电发射、光电系统等方面的研究。Email:bkchang@njust.edu.cn

0 引言

红外与可见光融合夜视系统可以综合红外探测器和可见光探测器的优点,提供具有互补信息的融合视频序列,在军事、反恐、搜救等领域具有广泛的运用价值。传统的融合模式采用基于逐像素的融合结构,将两个视频序列中所有的对应像素进行逐一融合计算,这种方式进行融合主要存在两个缺点:(1)运算数据运算量巨大,在实现复杂融合算法时需要大量占用处理器资源,阻塞数据传输,降低夜视融合系统的处理效率;(2)由于红外探测器对场景亮度不敏感,不能真实反映场景信息,且探测输出的结果不符合人眼视觉习惯,对于红外与可见光融合夜视系统而言,相当于在可见光探测器中引入背景噪声,导致融合视频的背景清晰度大大下降,从而影响融合系统的目标探测性能与视觉效果。采用红外运动目标与可见光视频融合的方法可以解决上述问题,这种融合结构仅对场景中的目标进行融合,其他的背景相关信息均由可见光传感器提供,在减少运算数据量的同时大大增加了融合结果的信噪比,提高了融合系统的探测性能。Liu Kun 等提出一种采用 NSCT 和区域分割相结合的方法,实现红外目标与可见光视频的融合^[1];Yifeng Niu 等采用帧间差法和目标聚类的方法完成分割后,将它们在 DWT 域中融合,可以得到目标突出的融合结果^[2];李振华等通过对红外序列中的运动目标进行检测,得到具有红外运动目标信息和可见光背景的融合结果^[3]。虽然众多学者提出了不同针对红外目标与可见光视频融合的方法,但是这些方法大多运算量大,计算复杂,基本不能够在融合系统中实时运行。针对以上问题,采用 FPGA+DSP 的结构设计实现了红外视频运动目标与可见光融合的实时系统,其中 FPGA 实现基于人眼视觉的红外视频运动目标分割方法,分割后的红外目标和可见光序列作为视频源,同时输入以 DSP 为核心的处理电路进行融合处理,最后输出背景细节清晰、目标特性显著的融合视频序列,提高了融合系统的目标探测性能,降低了融合数据量,大大减少了融合处理时间。

1 融合系统设计

1.1 探测器结构设计

为了达到既保证视场重合度,又不会损失光能

的目的,系统选用平行光轴的设计方案,其结构如图1所示。经过大量实验,选定系统的重合度为90%,其光轴平行度计算如下。假设视场为 θ mrad, f 为光学镜头焦距, d 为探测器边长, u 为目标距离, b 为镜头间距离,则 CCD 镜头的视场为:

$$\tan\theta = \frac{d}{2f} \quad (1)$$

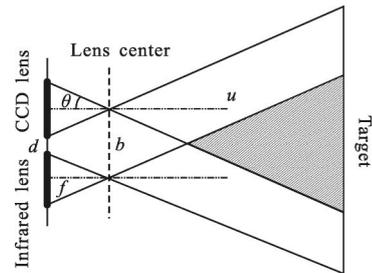


图1 探测器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the detector

当目标与系统无限远时, θ 值很小,则上式可写为:

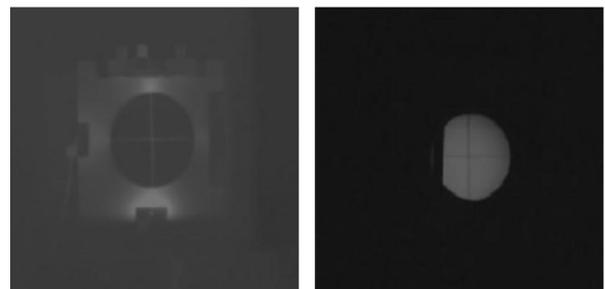
$$\tan\theta \approx \frac{d}{2f} \quad (2)$$

由图1可知,红外图像与可见光图像的视场重合度为:

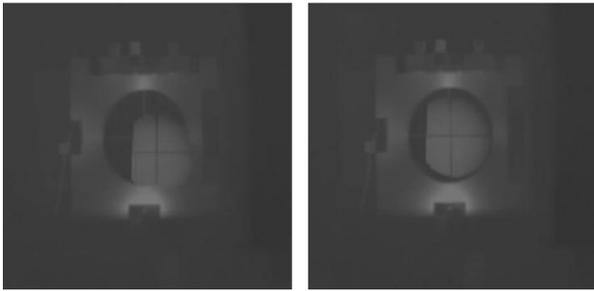
$$\varepsilon = \frac{2\theta u - b}{2\theta u} = 1 - \frac{b}{2\theta u} \quad (3)$$

对上式取极限,当 $\frac{b}{2\theta u}$ 趋于 0 时, $\varepsilon=1$,此时目标距离远大于镜头距离。在融合系统实际使用时,目标与系统距离一般为十几公里,而镜头之间的距离只有十几厘米,符合实际的使用。

设计探测器结构时,利用自行设计的多光谱光学系统光轴平行特性组合测试装置^[4]对可见光探测器和红外探测器的光轴进行调校,结果如图2所示。图2(a)表示红外探测器拍摄的结果,图2(b)表示可



(a) 红外十字线结果 (b) 可见光十字线结果
(a) Cross line of infrared (b) Cross line of visible light



(c) 光轴不平行结果 (d) 光轴平行结果
 (c) Image of optical axis not-parallel (d) Image of optical axis parallel

图 2 光轴平行度调校示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical axis parallelism of training

见光探测器拍摄的结果,图 2(c)表示光轴不平行时的结果,此时以红外探测器为基准调节可见光探测器的角度,直到二者的十字线重合,如图 2(d)所示,这样可以保证系统重合度大于 90%的技术指标。图 3 为已经设计好的红外与可见光融合夜视系统探测器前端。



图 3 红外与可见光融合夜视系统探测器前端

Fig.3 Detector front-end of infrared and visible night vision system

1.2 红外运动视频分割处理电路

如图 4 所示,红外运动视频分割电路以 FPGA 为核心,配合外围存储芯片和 A/D、D/A 芯片完成视频转换、信号握手、数据存储功能。其中 FPGA 选择

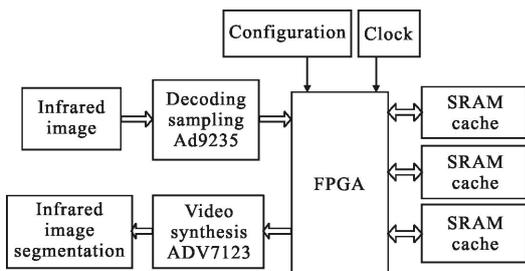


图 4 红外视频分割电路硬件结构

Fig.4 Hardware circuit structure of infrared video segmentation

EPIC20F400I7,负责完成红外视频分割算法、视频合成采样、数据传输控制等功能,由于红外运动目标分割的运算数据量巨大,需要大容量存储芯片对视频数据进行缓存,选择 CY7C1061V33 型 SRAM 作为外围存储芯片,两片 SRAM 采用乒乓操作工作模式完成对数据的存储与传输;A/D、D/A 芯片分别选择 AD9235 和 ADV7123,红外运动目标分割电路实物图如图 5 所示。

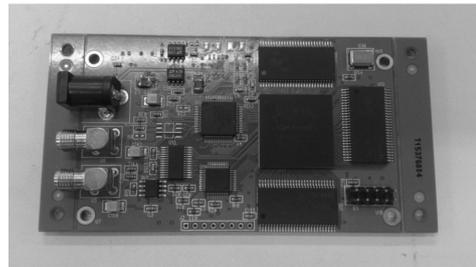


图 5 红外视频分割电路实物图

Fig.5 Physical map of infrared video segmentation circuit

1.3 图像融合电路

融合电路以 TI 公司的视频处理器 DM642 为核心,其工作主频为 720 MHz,运算速度 5 760 MIPS,主要负责数据预处理、夜视融合、系统管理、任务调度等工作,配合外围芯片(如:SDRAM、FLASH、CPLD 以及 A/D、D/A 芯片)完成视频的传输、融合、分解与合成。在经过系统初始化、捕获显示通道建立、数据统计之后,具有相同视场的红外视频和可见光视频经过 A/D 采样后,转换成 BT.656 格式数据从 DSP 的 VP1、VP2 口输入,在 DSP 中进行融合后从 VP0 口输出,经过 D/A 转换器转换成 PAL 制模拟视频,融合电路硬件结构如图 6 所示,实物如图 7 所示。

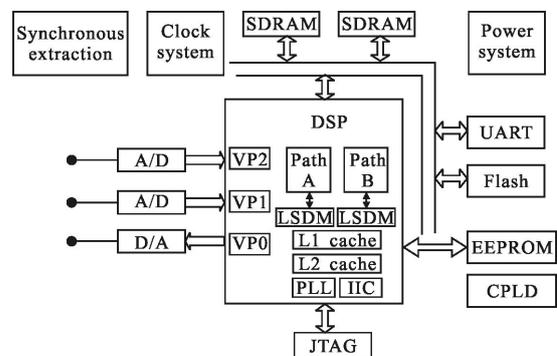


图 6 融合处理电路硬件结构

Fig.6 Hardware circuit structure of fusion circuit

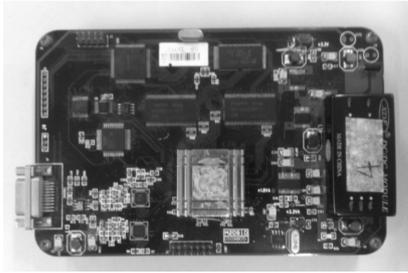


图 7 融合电路实物图

Fig.7 Physical map of fusion circuit

2 融合系统算法

2.1 红外视频分割算法

该系统采用基于人眼视觉的红外视频运动目标分割算法,这种算法适用于红外目标运动,在背景不变的情况下,将人眼视觉系统(HVS)作为红外运动目标分割的评价标准,如果区域中分割出的目标与背景间的亮度对比度越高,认为分割效果越好。利用公式(4)计算出待分割视频的视觉亮度差 ΔL_p ,将它作为红外运动目标的分割阈值,采用“种子”点生长的方法进行红外运动目标分割。把红外灰度信息映射到 CIELAB 空间,经过时间差分种子提取、人眼视觉的分割度量、阈值生长等步骤完成红外运动目标分割^[5],对于目标运动显著的场景具有较好的分割效果,但是其运算过程较为繁琐,耗时较长,较难在 FPGA 中实时处理。

$$\frac{\Delta L_p}{\Delta L} = c(L_b) = \begin{cases} \frac{1}{(0.575-0.009L_b)(L_b+1)} & \text{if } 0 \leq L_b < 60 \\ \frac{1}{0.035(L_b+1)} & \text{if } 60 \leq L_b \leq 200 \\ \frac{1}{(0.035+0.001(L_b-200))(L_b+1)} & \text{if } 200 < L_b \leq 255 \end{cases} \quad (4)$$

对参考文献[5]提出的算法进行简化,通过时间差分法得到红外运动目标的轮廓,近似地认为目标轮廓部分为红外目标图像的“种子”点;根据经验,选定背景区域的平均亮度值为 150,当系统刚上电时,红外视频分割电路计算出场景与目标的亮度标准差 ΔL ,如公式(5),将计算结果存储。

$$\Delta L = \left\{ \frac{1}{n_f} \sum_{ij \in \Omega} [L(i,j) - L_b]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

系统中,含有“种子”点的目标在像素时钟作用

下,经过由移位寄存器组成的缓存模块,再经过窗提取模块和累加模块,采用“种子”点为中心的八邻域进行计算与分割模板^[6]相乘后相加,以 ΔL 作为阈值进行“种子”点生长。为了提高系统的实时性,窗提取模块的乘法运算采用移位形式进行,其过程如图8所示。

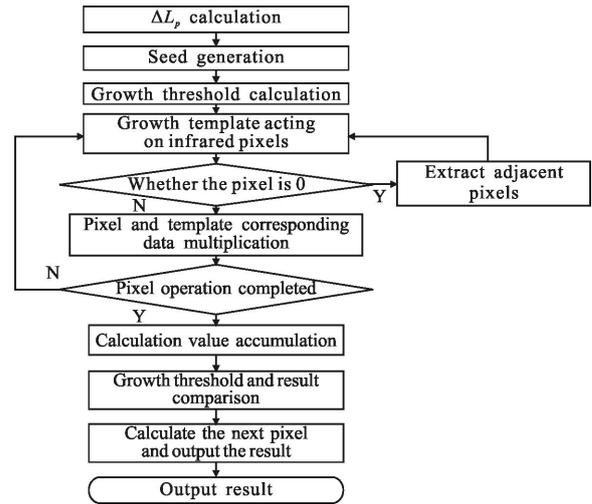


图 8 红外视频“种子”点生长流程

Fig.8 Flow chart of "seed" growth of infrared video

2.2 基于目标特性的加权融合算法

在夜视融合系统中,传统的加权融合算法具有计算简单、实时性强等优点,但是其权值的选择缺乏一定的依据。目标特性分析在夜视融合和目标探测中具有重要地位,由于涉及到不同波段的融合探测,对于红外与可见光融合夜视系统而言,必须从目标背景的辐射特性、反射特性、探测器成像特性、目标属性等多方面因素考虑。该系统采用基于目标特性的加权算法^[7],对于融合而言,是被探测目标的背景对比度^[8]、探测器特性^[9]、大气传输特性^[10]和目标距离尺寸特性^[11]共同作用的结果,红外成像系统中的目标背景对比度为:

$$K_{IR} = C_{IR} \cdot \alpha_{IR} \cdot \sigma_{IR} \cdot \lambda \quad (6)$$

可见光成像系统中的目标背景对比度为:

$$K_{LL} = C_{LL} \cdot \alpha_{LL} \cdot \sigma_{LL} \cdot \lambda \quad (7)$$

式中: C_{IR} 、 C_{LL} 分别表示被探测目标的辐射对比度和反射对比度; α_{IR} 和 α_{LL} 表示成像系统与目标的光谱匹配系数; σ_{IR} 和 σ_{LL} 分别为大气中目标的辐射系数和反射系数; λ 表示目标的距离因子,通过参考文献[7-10]可以计算出上述参数。 V_{IR} 和 V_{LL} 分别表征红外探

测器和可见光探测器对某一个固定目标的探测性能,其值与目标探测性能成正比,将公式(6)、(7)合并可以得到加权融合系数为:

$$\varepsilon_{IR} = \frac{K_{IR}}{K_{IR} + K_{LL}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{LL} = \frac{K_{LL}}{K_{IR} + K_{LL}} \quad (9)$$

此时,加权融合算法改写为:

$$F = \varepsilon_{IR} \cdot F_{IR} + \varepsilon_{LL} \cdot F_{LL} \quad (10)$$

3 系统成像与实验

以运动的人为目标,在傍晚温度为 310 K,湿度为 90%的条件下,通过计算得到红外视频的加权系数为 0.65,可见光视频的加权系数为 0.35,采用图 3 所示的红外与可见光融合夜视系统前端进行融合成像实验,分别提取文中提出的方法处理得到的融合视频和传统方法处理后的融合视频,选择它们在相同帧下的实验结果进行对比,如图 9 所示,由于经过

暗,且对比度动态范围较小,在融合视频输出前进行对比度拉伸和亮度增强,能够有效解决上述问题,使得场景中的细节更明显。由于分割红外视频的特性,融合图像亮度不可避免会降低,但是对于夜视系统来说,它的主要作用是目标探测,目标探测性能是其主要技术指标,基于红外目标分割的融合方法可以很大程度上提升目标的探测能力,减少虚警率,而此时图像亮度的降低是可以容忍的。

从实验结果中可以明显看出:与传统融合方法相比,经处理过的融合结果的目标十分清晰,观察者可以轻易地发现场景中的目标,且融合视频中可见光成分丰富,背景细节清晰,很少受到红外探测器的“干扰”,经过对比度拉伸的融合图像更加符合人眼视觉习惯,具有更好的目标探测性能。根据人眼视觉特性选取目标及周围区域进行客观评价,采用清晰度、空间频率、目标对比度指标对融合结果进行比较,如表 1 和表 2 所示。从结果可以看出:经过文中提出的融合方法处理后得到的结果与传统融合方法得到的结果相比,各项评价指标至少提高了 90%,个别指标甚至提高了 7 倍以上,大大提高了夜视系统目标的探测性能和探测概率。

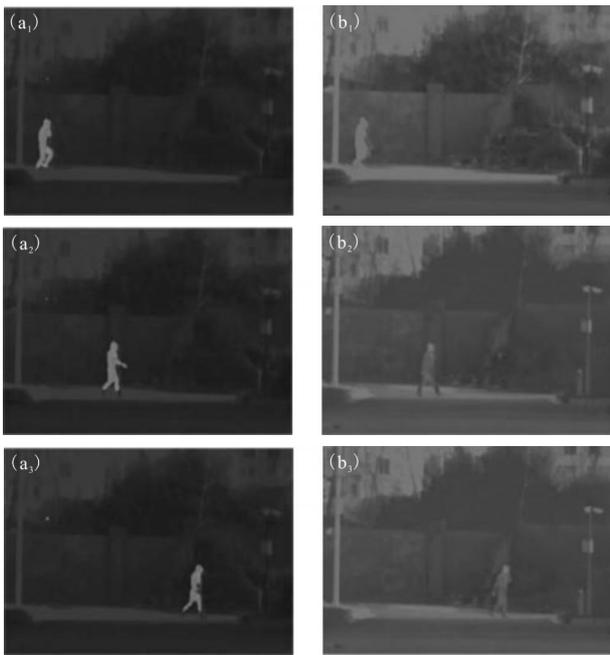
表 1 红外运动目标与可见光融合结果客观评价
Tab.1 Objective evaluation results using moving target in infrared and visible fusion

Evaluation index	The 50th frame	The 175th frame	The 300th frame
Definition	6.33	6.51	6.43
Spatial frequency	13.86	14.49	15.40
Target contrast	244.87	315.87	324.55

表 2 传统红外与可见光融合结果客观评价

Tab.2 Objective evaluation results using traditional infrared and visible fusion

Evaluation index	The 50th frame	The 175th frame	The 300th frame
Definition	3.85	3.47	3.67
Spatial frequency	7.62	7.07	6.73
Target contrast	60.87	64.86	52.09



(a) 文中方法第 50、175、300 帧结果
(b) 传统方法第 50、175、300 帧结果
(a) Results of the 50th, 175th, 300th frame using the method in this paper
(b) Results of the 50th, 175th, 300th frame using the traditional method

图 9 融合实验结果

Fig.9 Result of image fusion experiment

分割后的红外视频仅在目标处的灰度值较大,其他区域的灰度值都为“0”,如果直接输出会导致图像偏

4 结论

文中研制了一种基于红外运动视频和可见光融合的夜视系统,采用自行研制的光轴平行度校准系统对其探测器前端进行光轴调整,保证红外探测器和 CCD 的光轴平行度大于 90° ,保证融合的精准度;分别利用 FPGA 和 DSP 芯片组成了红外运动目标分割处理电路和融合处理电路,其中在 FPGA 电路中实现了简化的基于人眼视觉的红外目标分割算法,在 DSP 电路中实现了基于目标特性的加权融合算法。通过实验验证了文中研制的系统在得到一系列目标突出、背景清晰的融合序列,大大提升夜视系统的目标探测性能和目标探测概率。

参考文献:

- [1] Liu Kun, Guo Lei, Li Huihui, et al. Fusion of infrared and visible light images based on region segmentation [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22: 75–80.
- [2] Niu Yifeng, Xu Shengtao, Wu Lizhen, et al. Airborne infrared and visible image fusion for target perception based on target region segmentation and discrete wavelet transform [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, ID275138.
- [3] Li Zhenhua, Jing Zhongliang, Sun Shaoyuan, et al. Infrared and visible dynamic image based on moving target detection [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(8): 1304–1311. (in Chinese)
李振华, 敬忠良, 孙韶媛, 等. 基于目标检测的红外和可见光动态图像融合 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(8): 1304–1311.
- [4] Zhan Qihai, Fu Rongguo, Chang Benkang. Optical axes boresight instrument for multispectral optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(5): 4–6. (in Chinese)
詹启海, 富容国, 常本康. 多光谱光学系统光轴平行性组合测试装置[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 4–6.
- [5] Sun Bin, Min Chaobo, Zhang Junju, et al. A method for moving objects segmentation based on human vision perception in infrared video [J]. *Optical Review*, 2014, 21(1): 27–34.
- [6] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [7] Yang Wenbin, Zhang Junju, Xu Hui, et al. Study of infrared and LLL image fusion algorithm based on the target characteristics [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(1): 56–60. (in Chinese)
杨文彬, 张俊举, 许辉, 等. 基于目标特性分析的红外与微光图像融合算法[J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 56–60.
- [8] Yuan Yihui. Fusion and evaluation technology of infrared and visible images [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
袁轶慧. 红外与可见光图像融合及评价技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [9] Liu Lei, Chang Benkang. Spectral matching factors between super S25 and new S25 photo caathodes and reflective radiation of objects [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(3): 616–619.
- [10] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811–816. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811–816.
- [11] Bailey H H. Target Detection Through Visual Recognition and a Quantitative Model [M]. New York: The Rand Corporation, 1970.